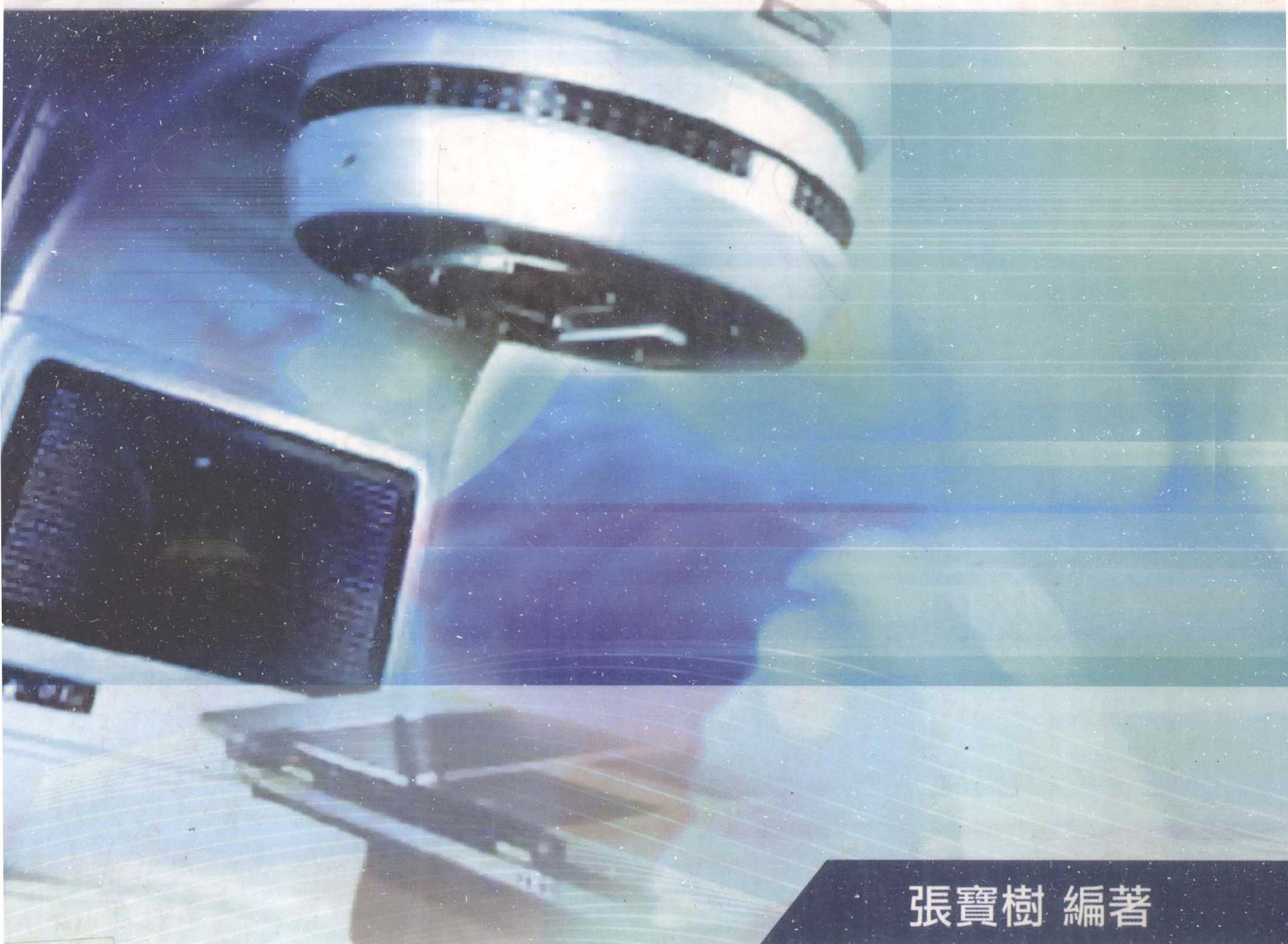


放射治療物理學

醫學物理、放射治療技術與器材、輻射防護



張寶樹 編著



合記圖書出版社 發行

放射治療物理學

醫學物理、放射治療技術與器材、輻射防護



張寶樹 編著



合記圖書出版社 發行

國家圖書館出版品預行編目資料

放射治療物理學：醫學物理、放射治療技術與器材、
輻射防護 / 張寶樹編著. -- 初版. -- 臺北市：
合記，2004 [民 93]
面；公分
含參考書目及索引
ISBN 986-126-078-1 (平裝)

1. 放射物理學 2. 放射線療法

415.216

93003163

書名 放射治療物理學－醫學物理、放射治療
技術與器材、輻射防護
編著 張寶樹
發行人 吳富章
發行所 合記圖書出版社
登記證 局版臺業字第 0698 號
社址 台北市內湖區(114)安康路 322-2 號
電話 (02)27940168
傳真 (02)27924702
網址 www.hochi.com.tw

總經理 合記書局
北醫店 臺北市信義區(110)吳興街 249 號
電話 (02)27239404
臺大店 臺北市中正區(100)羅斯福路四段 12 巷 7 號
電話 (02)23651544 (02)23671444
榮總店 臺北市北投區(112)石牌路二段 120 號
電話 (02)28265375
臺中店 臺中市北區(404)育德路 24 號
電話 (04)22030795 (04)22032317
高雄店 高雄市三民區(807)北平一街 1 號
電話 (07)3226177
花蓮店 花蓮市(970)中山路 632 號
電話 (03)8463459

郵政劃撥 帳號 19197512 戶名 合記書局有限公司

西元 2004 年 3 月 10 日 初版一刷



作者簡介

張寶樹

曾獲高雄醫學院醫學研究所博士，清華大學原子科學研究所保健物理組碩士，畢業於清華大學核子工程學系。教育部公費留學考試博士後研究人員及格。專長為放射物理、保健物理、醫學物理、放射治療技術與器材。現任高醫放射系副教授，兼職高醫附設醫院放腫科與輻防室，中山大學物理系兼任副教授。曾任美國密蘇里大學哥倫比亞校區MURR 博士後研究員，行政院原子能委員會輻射偵測中心代放射化學組長。合格醫學物理師（醫物甄字第019號），原子能委員會認可高級輻射防護專業人員（輻專高字第003號，已換發輻專師字00095號），非醫用可發生游離輻射設備高級操作執照（非醫人字第10753號）。

曾獲清華大學同學會頒贈『清華之光』盾牌，中山技術發明獎，高醫優良教師。發表於國內外期刊論文40餘篇，國內外學術會議論文60餘篇，專書十餘冊。

謹以此書獻給敬愛的父母親與親愛的妻子

翁序

高雄醫學大學醫學放射技術學系張寶樹副教授繼於民國90年(2001)出版醫用保健物理學巨著後，今年(2004)又將推出另一巨著放射治療物理學，長達千頁以上。

昔日由加拿大籍教授所著：H.E.Johns and J.R.Cumingham, *The Physics of Radiology*, 4th ed., Charles C.Thomas Publisher, Springfield, Illinois, USA (1983) 曾為放射物理學經典之作，並曾譯為中文。惜自1983年後因該書主要作者去世而中斷修訂和出版。

張寶樹副教授任教於高雄醫學大學，復兼職於高醫附設中和紀念醫院放射腫瘤科，迄今已逾20年，可謂學驗俱豐，為撰寫這一類專書的最佳人選。本書涵蓋範圍包括：醫學物理、放射治療技術與器材、以及輻射防護等共十章。另附習題解答、美國AAPM的建議、重要數據表、以及中英文索引，可作為教材和參考書籍，不但嘉惠學子，亦提供專業人士一本良好的參考書。

本書即將由合記圖書出版社發行，謹綴數語為之道賀。

翁寶山 謹識
民國93年3月1日於
新竹市清華園

序

本書於民國八十九年初開始撰寫，於民國九十三年初完成。本書共分十章，主要敘述醫學物理、放射治療技術與器材、放射治療的輻射防護與品質保證，以為國內大學院校放射技術科系與研究所學生的教科書，並可為放射腫瘤醫師的參考教材。

本書以作者二十餘年來在高雄醫學大學講授「放射物理學」、「保健物理學」，以及參與「放射治療學」、「放射治療技術學」、「放射治療設備學」之教學經驗為基礎，輔以二十餘年來在高雄醫學大學附設中和紀念醫院放射腫瘤科的醫學物理與輻射防護經驗，是一本深具物理理論與臨床實務的放射治療物理學。

本書共分十章，全書計有圖 222、表 87、公式 392、例題 358 與習題 1117。本書附錄，詳解習題，並有 AAPM TG-21 與 AAPM TG-51、質量衰減係數與質量能量-吸收係數，以及電子的阻擋本領、射程、輻射產率與密度效應參數。本書附有中英文索引、英中文索引，以利學習者查閱。本書是作者自行打字、排版與校對，費時四年才完成。

清華大學翁師寶山教授欣然為序，翁師與鍾堅教授的論文指導，高雄醫學大學醫學放射技術學系與附設醫院放射腫瘤科的師長同仁，國內放射腫瘤學界與醫學物理學界的師長友人提供協助，謹此深表謝意。對於合記圖書出版社吳富章先生、黃召凡先生與吳貴惠小姐的協助出版，於此一併致謝。

作者才疏學淺，疏忽錯誤恐在所難免，尚祈國內放射技術學界、放射腫瘤醫學界與醫學物理學界的先進，不吝指正，是幸。

最後要感謝家人之支持，並將此書獻給敬愛的父母親與親愛的妻子。

張寶樹 謹識

民國 93 年 2 月 5 日甲申年元宵節
於高醫醫放系、附設醫院放腫科



目錄

翁序.....	ix
序	xi

第一章 放射治療物理學導論

1.1 國內放射治療的現況	1
1.2 放射治療物理學的內容	2
1.3 醫學物理學與醫學物理師的職責	4
1.4 放射治療的原理	5
1.5 放射治療的流程	8
總結	13
參考文獻	13
習題	14

第二章 基礎放射治療物理學

2.1 輻射單位	15
2.2 輻射衰減	24
2.3 核種衰變	33
2.4 輻射測量	51
總結	61
參考文獻	63
習題	64

第三章 高能輻射的產生

3.1 鈷60治療機	67
3.2 醫用直線加速器	73
3.3 加馬刀、X刀與電腦刀	94
3.4 遙控後荷式近接治療機	103
總結	114



參考文獻	115
習題	117

第四章 臨床劑量學

4.1 光子治療劑量學	121
4.2 電子治療劑量學	178
4.3 關於AAPM TG-51	188
4.4 劑量計算	209
總結	245
參考文獻	249
習題	251

第五章 輻射生物學

5.1 輻射對DNA的傷害	263
5.2 細胞殘存曲線	272
5.3 正常組織的劑量-回應關係	277
5.4 腫瘤系統的模型	282
5.5 輻射敏感度	284
5.6 細胞輻射傷害的修復	289
5.7 增氧比、直線能量轉移、相對生物效能與射質因數 ..	292
5.8 輻射致敏感劑、生物減少藥物與輻射保護劑	302
5.9 細胞週期、腫瘤動力學與腫瘤的預測分析	305
5.10 輻射健康效應	311
總結	321
參考文獻	324
習題	326

第六章 放射治療輔助設備

6.1 傳統式模擬定位機	333
6.2 電腦斷層掃描模擬定位機	339
6.3 模具與擋塊的製作	351
6.4 不對稱準直儀系統	370
6.5 楔形濾器	373
6.6 多葉式準直儀系統	381

6.7 電腦軟體管理系統.....	392
6.8 電子驗證影像裝置.....	395
6.9 影像處理.....	397
總結.....	400
參考文獻.....	402
習題.....	403

第七章 電腦治療計畫

7.1 名詞解釋.....	411
7.2 輻射射束與等劑量分布.....	415
7.3 劑量計算修正.....	419
7.4 三度空間 (3- D) 治療計畫.....	434
7.5 正向治療計畫與逆向治療計畫.....	454
7.6 近接治療的劑量計算.....	461
總結.....	470
參考文獻.....	478
習題.....	481

第八章 放射治療技術

8.1 基本體外照射放射治療技術.....	487
8.2 旋轉治療技術與弧形治療技術.....	489
8.3 乳房相切照野治療技術.....	490
8.4 總小管照射與斗篷照野.....	493
8.5 全腦脊髓照射技術.....	498
8.6 全身皮膚電子射束照射技術.....	499
8.7 全身照射技術.....	504
8.8 鼻咽癌的放射治療.....	508
8.9 全腹部照射技術.....	509
8.10 立體定位放射手術.....	513
8.11 三度空間順形放射治療技術.....	517
8.12 強度調控放射治療技術.....	522
8.13 緊急放射治療技術.....	535
8.14 近接治療技術.....	536
總結.....	538



參考文獻	541
習題	542

第九章 放射治療的輻射防護

9.1 放射治療的輻射防護法規	549
9.2 放射治療的設備與物質之輻射安全審查項目	563
9.3 屏蔽材料	570
9.4 醫用直線加速器治療室的屏蔽設計	574
9.5 鈷 60 治療機治療室的屏蔽設計	590
9.6 遙控後荷式近接治療室的屏蔽設計	595
9.7 治療甲狀腺癌的 ^{131}I 治療室之屏蔽設計	598
9.8 輻射防護屏蔽設計其他應注意事項	602
總結	619
參考文獻	629
習題	630

第十章 放射治療的品質保證

10.1 醫療曝露品質保證之法源	637
10.2 輻射醫療曝露品質保證組織與專業人員設置及委託 相關機構管理辦法	638
10.3 輻射醫療曝露品質保證標準	641
10.4 品質保證儀器	649
10.5 放射治療機器的接收測試	650
10.6 使治療機器正式臨床應用	656
總結	658
參考文獻	658
習題	660

- 附錄 A 習題解答
- 附錄 B AAPM TG-21 & TG-51
- 附錄 C 質量衰減係數與質量能量-吸收係數
- 附錄 D 電子的阻擋本領、射程、輻射產率與密度效應參數
- 中英文索引
- 英中文索引

第一章 放射治療物理學導論

1.1 國內放射治療的現況

放射治療是癌症治療的方式之一，約有 35-45% 的癌症病患接受放射治療。最常見的癌症放射治療有肺癌、子宮頸癌、子宮癌、鼻咽癌、口腔癌、頭頸部腫瘤、腹部腫瘤、直腸癌、乳癌、淋巴腫瘤、腦癌、皮膚癌等，而單純良性疾病接受放射治療的比率則約僅占放射治療的 1%。

放射治療是一種可以提供癌症病患多種類型治療的工具。放射治療的主要治療方式有治療性(curative)與姑息性(palliative)治療兩種，其中，治療性治療又稱為根治性(definite)治療、治癒性治療。放射治療也可以提供輔助性(adjuvant)治療。接受放射治療的癌症病患中，約有 60-70% 的病患其治療目的是根治性治療，約有 10-20% 的病患其治療目的是手術後復發而接受放射治療。

一個放射治療部門或一個放射腫瘤部門所需的基本設備應包括遠隔治療機、近接治療機、模擬攝影定位機、電腦治療計畫系統與模具室(mold room)等。一個放射治療部門或一個放射腫瘤部門需要放射腫瘤專科醫師、醫學物理師、醫學劑量師、醫事放射師、護理師等基本人力；此外，其它人力如維修工程師、營養師、癌病登記人員、社工師、心理治療師等。

具備完整設備與人力的放射治療部門或放射腫瘤部門，才能提供癌症病患一個完整的放射治療。如使用電腦做放射治療計畫已成為必要的治療工具之一，進行三度空間(3-D)的放射治療已逐漸取代二度空間(2-D)的放射治療。愈複雜專精的放射治療，需有專門的放射腫瘤專科醫師負責，更需要完整設備與人力的配合，方能達到放射治療的目的。

通常使用傳統的分次放射治療的癌症病患約為 70%，而整體的治療完成率約可達 80%。目前國內的放射治療部門或放射腫瘤部門除做傳統的分次遠隔放射治療(teletherapy)、遙控後荷式近接治療(remote afterloading brachytherapy)之外，亦正從事更複雜專精的放射治療技術，如立體定位放射手術(stereotactic radiosurgery, SRS)、三度空間順形放射治療(three-dimensional conformal radiotherapy, 3-D CRT)、強度調控放射治療(intensity modulated radiotherapy, IMRT)等。



依據行政院原子能委員會於民國 93 年 2 月 10 日的統計資料，國內 55 所醫療院所的放射治療設備數目(中華放射腫瘤醫學會的統計資料為 50 所醫療院所)，如表 1.1 所示。設有放射治療部門或放射腫瘤部門的醫療院所，大部份是集中在台北、台中與高雄等三大都會區。

1.2 放射治療物理學的內容

放射治療物理學(radiation therapy physics)的內容包括放射物理的原理、放射治療設備與放射治療技術。第一章放射治療物理學導論，介紹國內放射治療的現況、放射治療物理學的內容、醫學物理學與醫學物理師的職責、放射治療的原理、放射治療的流程，讓學習這門功課的放射技術科系與放射相關學系的同學們有一初步的概念。

第二章基礎放射治療物理學，介紹輻射單位、輻射衰減、核種衰變、輻射測量等四個基本概念，以作為研習放射治療物理學的基礎。第三章高能輻射的產生，介紹目前用於放射治療的鈷 60 治療機(cobalt-60 unit)、醫用直線加速器(medical linear accelerator, medical LINAC)、加馬刀(gamma knife)、X 刀(X knife)、電腦刀(Cyberknife)與遙控後荷式近接治療機(remote afterloading unit)等，並且介紹這些放射治療設備的品質保證。

第四章臨床劑量學，介紹高能光子治療劑量學與高能電子治療劑量學，如%DD、BSF、TAR、SAR、TPR 與 TMR 等，並介紹臨床治療的劑量計算。關於放射治療的劑量測定，則介紹美國醫學物理師協會(American Association of Physicists in Medicine, AAPM) 1999 年 AAPM TG-51 報告，並述及 1983 年 AAPM TG-21 報告。

表 1.1 國內的放射治療設備數目*

類別	執照總數
鈷 60 遠隔治療機	14
一般近接治療機	1
遙控後荷式近接治療機	53
治療型 X 光機	3
醫用直線加速器	95
總計	166

*不包括遠隔治療定位的模擬機、CT 模擬機、近接治療定位的一般 X 光機。

輻射生物學是醫學物理師(medical physicists)必備的本職學能之一，也是醫事放射師從事放射治療應該具備的學識之一。第五章輻射生物學，介紹輻射對 DNA 的傷害、細胞殘存曲線、輻射敏感度(radiation sensitivity)、細胞輻射傷害的修復、一元二次方模型(linear-quadratic model, LQ model)與組織器官的耐受劑量(tolerance doses)，應用細胞存活率(survival rate)與輻射劑量關係的 LQ 模型於放射治療、細胞週期、輻射健康效應。

第六章放射治療輔助設備，介紹目前放射治療所使用的一些輔助設備，如傳統式模擬定位機(simulator)、電腦斷層掃描模擬定位機(CT simulator)、模具與擋塊的製作、不對稱準直儀(asymmetric jaws)系統、楔形濾器、多葉式準直儀(multileaf collimators, MLCs)系統、電子影像驗證裝備(electronic portal imaging device, EPID)，並且介紹與放射治療有關的電腦軟體(software)管理系統、影像處理。

放射治療計畫(radiation treatment planning, RTP)的擬定是醫學物理師的職責之一，也是醫事放射師應該瞭解的放射治療事項之一。第七章電腦治療計畫，主要介紹二度空間電腦治療計畫系統(2-D treatment-planning computer system)、三度空間電腦治療計畫系統(3-D treatment-planning computer system)、正向治療計畫與逆向治療計畫、近接治療的劑量計算。

第八章介紹各種放射治療技術，如單照野(single field)治療技術與多重照野(multiple fields)的常規放射治療技術，利用 3-D 原理配合電腦立體定位的放射手術，逆向(reverse)治療計畫的劑量計算配合調控式多葉式準直儀(multileaf intensity modulating collimator)所執行複雜精密的 3-D 立體旋轉照射之強度調控放射治療(IMRT)，使輻射照射順著腫瘤形狀的立體順形放射治療(3-D CRT)，等中心(isocenter)遠隔治療技術之一的弧形治療(arc therapy)技術，治療早期乳癌的乳房相切照野治療技術，鼻咽癌的放射治療，骨髓移植(bone marrow transplantation, BMT)前的高劑量全身照射治療(total-body irradiation, TBI)，全身皮膚電子射束照射(total skin electron beam irradiation, TSEB irradiation)主要用於有廣泛性皮膚病變的表皮淋巴瘤，如屬於 T-細胞淋巴瘤的蕁樣黴菌病(mycosis fungoides)，治療淋巴瘤的全身淋巴照射治療技術，全腹部照射治療技術是針對一般卵巢癌或腹部有癌症浸潤的放射治療技術，由腦脊髓液轉移腦瘤的全腦脊髓照野(cranio-spinal field)治療技術，使用 ^{60}Co 種粒射源或 ^{192}Ir 線射源作為高劑量率(high dose rate, HDR)的遙控後荷式近接治療，組織插種治療(interstitial implants)等。另於習題中介紹術中照射治療(intraoperative radiotherapy, IORT)、質子治療(proton therapy)與硼中子捕獲治療(boron neutron capture therapy, BNCT)但質子治療與硼中子捕獲治療尚未引入國內的臨床放射治療。



第九章放射治療的輻射防護，主要介紹放射治療的輻射防護法規，放射治療室的輻射防護屏蔽設計，如屏蔽材料、醫用直線加速器治療室的屏蔽設計、鈷 60 治療機治療室的屏蔽設計、遙控後荷式近接治療室的屏蔽設計、 ^{131}I 治療室之屏蔽設計，並且介紹屏蔽設計其他應注意事項。

第十章放射治療的品質保證，介紹醫療曝露品質保證之法源，如輻射醫療曝露品質保證組織與專業人員設置及委託相關機構管理辦法、輻射醫療曝露品質保證標準，各種放射治療的品質保證儀器，放射治療機器的接收測試(acceptance testing)以及使放射治療機器正式臨床應用或服役(commissioning)等。

本書各章均附有總結(summary)、例題與習題，並於附錄中列出習題解答。本書的附錄以放射治療所需的臨床數據為主。由於放射治療物理學為一應用近代物理學的臨床醫學科學，所以最後並附上中英文與英中文索引，以方便查用。

1.3 醫學物理學與醫學物理師的職責

放射治療物理學(radiation therapy physics)為醫學物理學(medical physics)的一部份，且為醫學物理師主要必備的本職學能，也是從事放射治療的醫事放射師必須研習的本職學科。

醫學物理學為一種結合物理、工程、醫學、生物的新專門學科。醫學物理學是將物理、工程方面的專業知識與醫學、生物結合，將其應用於放射治療、放射診斷、核子醫學、醫療設備與技術的改良，並且參與教學、研究、訓練的工作。

醫學物理師是醫院中醫療專業的醫療人員(medical staff)。國內醫療院所的放射治療部門或放射腫瘤部門均有醫學物理師的編制，唯其醫療專業證照尚未成為考選部考照的醫療專業職科之一。

目前國內醫學物理師主要參與放射治療的臨床工作。在放射治療部門或放射腫瘤部門工作的醫學物理師，其臨床工作包括：放射治療設備的校驗、放射治療計畫的擬定、放射治療計畫的執行與監督、放射治療過程的品質保證。醫學物理師的研究工作包括：放射治療設備的研發與改進、放射治療技術的研發與改進、輻射生物學的研究等。醫學物理師應該參與醫師、醫事放射師與醫學物理師的教育訓練工作。此外，醫學物理師也應該參與醫院輻射防護的教育訓練工作，社區民眾的輻射防護之教育宣導工作等。

由於目前國內醫療院所的放射治療部門或放射腫瘤部門添加許多新的放射治療設備，如 3-D 放射治療計畫(3-D RTP)電腦系統、配有多葉式準直儀(MLCs)與電子影像驗證裝備(EPID)的直線加速器(LINAC)、CT 模擬定位機(CT simulator)，並且採用較新的放射治療技術，如 3-D 順形放射治療(3-D CRT)、強度調控放射治療(IMRT)、放射手術(radiosurgery)等，所以醫學物理師在放射治療中所扮演的角色日益重要。國內的醫學物理學會在合放射腫瘤學會的支持下，依據美國醫學物理師協會(AAPM)的認證制度(certification)，已於 1999 年開始國內的醫學物理師/醫學劑量師認證工作。

1.4 放射治療的原理

放射治療的原理就是利用高能輻射，如高能 X 光、 γ 射線、高能電子射束(electron beam)等對於腫瘤病灶照射，以期達到控制與治療之目的。目前國內用於放射治療的高能輻射，如直線加速器所產生的 6、10、15、18 MV 的高能 X 光射束與 6、9、12、15、16、18、20 MeV 的高能電子射束，放射性核種 ^{60}Co 、 ^{192}Ir 所釋出的 γ 射線，其中，直線加速器所產生的高能 X 光射束通常以雙光子輸出為主，高能電子射束以 5 種不同能量為主。

放射治療所使用的高能光子射束，其與人體組織的相互作用，主要以康普吞效應(Compton effect)、成對發生(pair production)為主，相互作用之後一定會產生電子，如康普吞散射碰撞會產生回跳電子(recoil electron)。這些電子與人體組織的相互作用和直線加速器所產生的高能電子射束進入人體組織的相互作用是相同的，其均會產生游離(ionization)作用，進而破壞腫瘤細胞的分子鍵，造成腫瘤細胞的退化死亡與腫瘤組織的萎縮，以達到放射治療癌症的目的。這種高能輻射照射腫瘤病灶的治療方式是屬於輻射生物效應中的確定效應(deterministic effect)。

例 1.1 電子與物質的作用方式為何？

解：電子與物質的作用方式是由於電學庫倫力的相互作用(Coulomb force interaction)，其作用方式有彈性碰撞(elastic collisions)與非彈性碰撞(inelastic collisions)等兩種。

電子的彈性碰撞包括電子與構成物質的原子之原子核外電子的彈性碰撞、電子與原子核的彈性碰撞等兩種。

電子的非彈性碰撞包括電子與構成物質的原子之原子核外電子的非彈性碰撞、電子與原子核的非彈性碰撞等兩種。



例 1.2 電子與物質的作用為何會產生游離作用？

解：電子與物質的作用，在彈性碰撞的過程中，電子是沒有動能的損失，電子的動能只是在與電子作彈性碰撞的粒子之間重新分配。因為電子的彈性碰撞沒有能量的損失，所以就沒有能量轉移(energy transfer)與能量吸收(energy absorption)。放射線學(radiology)通常不考慮沒有能量損失的彈性碰撞。

在電子作非彈性碰撞的過程中，電子的一些動能會轉化為其他形式的能量，如光子能量、游離能量與激發(excitation)能量。當電子的動能轉變為光子能量時，就會產生能量連續的制動輻射(bremsstrahlung)，而俗稱制動輻射為 X 光。

在低原子序數 Z 的介質中，如水、軟組織、脂肪、石墨等，電子主要是經由與原子核的電子之非彈性碰撞過程而損失能量，此種非彈性碰撞過程會造成游離現象，其中，水的有效原子序數(effective atomic number) \bar{Z} 為 7.51，人體軟組織(肌肉)的 \bar{Z} 為 7.64，脂肪的 \bar{Z} 為 6.46，而骨骼的 \bar{Z} 為 12.31。

在高原子序數 Z 的介質中，如常用鉛($_{82}\text{Pb}$)作為屏蔽材料，電子在鉛中則主要是經由制動輻射的作用而損失其動能，而制動輻射的發生機制是入射的高速電子與原子核的非彈性碰撞。

電子作非彈性碰撞的能量損失，主要有游離損失(ionization loss)與產生制動輻射的輻射損失(radiation loss)兩種，其中，游離損失是碰撞損失(collisitional loss)的一種。電子的動能損失是以阻擋本領(stopping power)來表示。

例 1.3 當電子作非彈性碰撞的游離過程中，會再產生電子，請問這些電子最後的結果是什麼？

解：當電子作非彈性碰撞的游離過程中，會剝離構成介質的原子之原子核外的電子，被剝離的電子(stripped electron)就是軌域電子(orbital electron)，也就是束縛電子(bind electron)被剝離。

若被剝離的電子，其動能大到可以剝離電子軌域的更外層軌域電子時，就可產生另一個被剝離的電子，則稱此電子為二次電子(secondary electron)或稱為 δ 射線(δ -ray)。若電子繼續穿透深入作用介質，則電子會持續地被減能，最後是被作用介質所構成的原子所捕獲。

在作用介質內，高能電子經由一連串的非彈性碰撞過程而連續地減能。當電子達到熱能量(thermal energy)時，就會成為熱電子(thermal electron)或自由電子(free electron)而被周圍的原子所捕獲。